

Применение логико-вероятностного моделирования готовности для оценивания эффективности функционирования радиоэлектронных систем космических комплексов

А. В. Гришин

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
grishfam@yandex.ru

Аннотация. Consideration is given to modern and promising radio-electronic systems of space complexes. It has such features as increasing requirements for the operational efficiency, multi-functionality, high-integration hardware and software, non-monotonicity of reliability and availability models, etc. It is concluded that characteristics of the common logical-probabilistic method of system modeling and analysis are given advanced capabilities in comparison with classical logical-probabilistic methods, as well as features of the new logical-deterministic modeling method for deterministic structures and sequence of events of system elements. It is proposed to use the common logical-probabilistic and logical-deterministic methods for modeling, analysis and comprehensive assessment of the availability and operational efficiency of radio-electronic systems.

Ключевые слова: *availability of radio-electronic systems of space complexes; operational efficiency of radio-electronic systems of space complexes; common logical-probabilistic modeling; logical-deterministic modeling*

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции резкого увеличения степени информатизации всех сфер человеческой деятельности, в том числе науки, производства, транспорта, обороны и безопасности государства, приводят ко всё большему использованию космических средств, что обуславливает постоянное увеличение численности, состава и типов орбитальных группировок (ОГ) космических аппаратов (КА). Непосредственное обеспечение применения КА осуществляется с помощью радиоэлектронных систем (РЭС), входящих в состав космических комплексов (КК) соответствующего целевого назначения. Современные и перспективные РЭС КК – это совмещённые и унифицированные РЭС, непосредственно выполняющие все основные функции управления КА различных типов и представляющие собой структурно-сложные системы.

Отличительными особенностями структурно-сложных РЭС КК являются: высокие (и возрастающие) требования к эффективности их функционирования, многофункциональность и многоканальность, резервирование и

модульность построения, наличие встроенных систем технического диагностирования, высокая степень интеграции аппаратных и программных средств, непрерывный режим применения, функционирование в составе суперсистемы (управления и обеспечения применения и эксплуатации), малосерийность производства, немонотонность моделей надёжности и готовности [1].

От эффективности функционирования РЭС КК (технической эксплуатации и применения по назначению) зависит качество выполнения целевых задач обеспечения применения ОГ КА, а сама эффективность функционирования РЭС определяется, как будет показано далее, в первую очередь, их готовностью к применению по назначению.

Исходя из перечисленных особенностей РЭС КК и их функционирования, стоит задача повысить достоверность оценивания готовности и эффективности РЭС КК.

II. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Эффективность – комплексное операционное свойство целенаправленного процесса функционирования системы, характеризующее его (процесса) приспособленность к достижению цели операции, реализуемой системой или, иначе говоря, к выполнению стоящей перед системой задачи [2]. Иными словами эффективность функционирования РЭС КК – это качество процесса их функционирования. Качество характеризуется набором существенных свойств процесса и самой системы, их показателей и соответствующих количественных значений показателей. При оценивании этих количественных значений используются определённые правила – критерии, которые можно подразделить на критерии допустимости, критерии оптимальности и критерии превосходства.

В ходе процесса функционирования РЭС КК для достижения его цели расходуются ресурсы (материальные, временные и др.). Приспособленность наилучшим образом

преобразовывать эти ресурсы в требуемые результаты является как свойством самой РЭС (её элементов и структуры), так и свойством процесса функционирования РЭС (способа и последовательности взаимодействия элементов и подсистем). Таким образом, свойства процесса функционирования системы и самой системы можно условно разбить на две группы: целевые (тактико-технические) и обеспечивающие (эксплуатационно-технические).

В качестве обеспечивающих могут выступать такие свойства РЭС КК и процессов их функционирования, как готовность, надёжность, живучесть, эксплуатационная технологичность и др. При этом для подсистем, обеспечивающих поддержание на заданном уровне этих свойств, последние, в свою очередь, будут являться целевыми. То есть имеет место определённая иерархия как самих систем (суперсистема – система – подсистема – элемент), так и целей их функционирования, и, соответственно – иерархия процессов функционирования систем.

Существенные свойства, обуславливающие качество процесса функционирования системы (операции), называются операционными. К основным операционным свойствам относятся: результативность, ресурсоёмкость и оперативность, которые и объединяются в комплексное операционное свойство – эффективность [2].

Показателем эффективности процесса целенаправленного функционирования РЭС КК выступает вероятность $P_{оц}$ достижения цели этого процесса, которую по критерию допустимости формально можно определить как вероятность того, что вектор Y_k показателей качества процесса выполнения задачи (или качества системы) находится в области допустимых значений Y'_k результатов функционирования:

$$P_{оц} = P(Y_k \in Y'_k)$$

Для критерия оптимальности, соответственно:

$$P_{оц} = P(Y_k \in Y''_k, Y''_k = extr),$$

где Y''_k – область тех допустимых значений показателей качества, для которых достигается экстремум.

Исходя из вышеизложенного, такой вектор показателей качества будет являться трёхмерным (трёхкомпонентным), состоящим, в свою очередь, из n -мерных векторов (компонент) показателей результативности V_{n1} , ресурсоёмкости R_{n2} и оперативности T_{n3} [2]:

$$Y_k = \langle V_{n1}, R_{n2}, T_{n3} \rangle$$

Каждая из компонент вектора зависит от тактико-технических (целевых) и эксплуатационно-технических (обеспечивающих) характеристик РЭС КК, условий её функционирования (применения и эксплуатации) и организации самого процесса функционирования (системы применения и эксплуатации). Наборы показателей этих компонент характеризуются, в общем случае, случайными величинами и в числе прочих отражают в каждый момент времени техническое состояние РЭС КК, т. к. являются существенными для её функционирования. Следовательно

оценивание и прогнозирование этих показателей является отправной точкой оценивания и прогнозирования готовности РЭС КК и далее – эффективности её функционирования. Важно и то, что основную ценность представляет именно априорная оценка эффективности функционирования РЭС КК, базирующаяся на прошлых и текущих результатах применения и эксплуатации, данных встроенного контроля технического состояния, другой дополнительной информации, поэтому вероятность $P_{оц}$ достижения цели системой в процессе её функционирования удобно представить условной вероятностью:

$$P_{оц} = P_z(A)P_n(B|A)P_{гз}(C|A \cap B),$$

где: $P_z(A)$ – вероятность наступления события A готовности системы к непосредственному применению в заданный момент времени;

$P_n(A|B)$ – вероятность наступления события B нахождения системы в состоянии готовности в течение заданного промежутка времени при условии наступления события A ;

$P_{гз}(C|A \cap B)$ – вероятность наступления события C выполнения задач по предназначению при условии пересечения событий A и B .

Анализ данного выражения показывает, что оценивание эффективности процесса функционирования РЭС КК может быть сведено к оцениванию готовности РЭС КК к применению по назначению, прогнозированию её готовности на требуемый период времени и прогнозированию выполнения РЭС КК задач по предназначению.

Всесторонний учёт особенностей современных РЭС КК приводит к тому, что их готовность, а следовательно и эффективность функционирования зависит от и собственных свойств РЭС КК, и от системы её применения и эксплуатации, и от различных внешних воздействий. Поэтому готовность необходимо понимать в большей степени комплексно, чем это принято в существующих нормативно-технических документах [3]. Вместе с готовностью аппаратной части РЭС КК, необходимо совокупно учитывать и готовность программного обеспечения, и готовность эксплуатирующего персонала. Так как именно готовность характеризует приспособленность системы к переводу из любого предусмотренного исходного состояния S_u в состояние непосредственного применения S_z и пребыванию в этом состоянии в течение требуемого времени τ , то оценивание и прогнозирование готовности к выполнению задач по предназначению является одним из основных путей повышения эффективности функционирования РЭС КК.

III. МОДЕЛИ ГОТОВНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Моделирование систем большой размерности и структурной сложности, таких как РЭС КК, и расчёт показателей эффективности их функционирования может осуществляться как с помощью вероятностных методов, так и детерминированных (в смысле структуры системы и

последовательности событий её элементов). Выбор одной определённой математической модели сопряжён с некоторыми принципиальными трудностями, и продуктивным является подход, заключающийся в последовательном рассмотрении отдельных моделей, характеризующих ту или иную сторону функционирования РЭС КК и агрегировании полученных моделей (вычисленных показателей) в общесистемную модель (показатели).

Так, одним из основных вероятностных методов является марковский анализ в пространстве возможных состояний системы, основанный на марковском свойстве отсутствия последствия, свойствах пуассоновского потока событий: стационарности и ординарности, а также экспоненциальности распределения времени пребывания системы в каждом состоянии [4].

С помощью методов сетевых графов и потоковых сетей моделируются детерминированные последовательности событий элементов анализируемой системы [5].

Важным классом методов анализа структурно-сложных систем являются логико-вероятностные методы (ЛВМ): деревья событий и отказов, структурно-логическое моделирование на основе структурных схем надёжности [4], а также т. н. общие логико-вероятностные методы (ОЛВМ), основанные на построении графических и аналитических моделей систем средствами математической логики [6].

Возможности ОЛВМ, отличающие их от классических ЛВМ, позволяют в наибольшей степени учесть ряд ранее перечисленных особенностей РЭС КК. К таким возможностям относятся [7]:

- использование для структурного описания систем универсального аппарата схем функциональной целостности (СФЦ);
- применение и на структурном, и на аналитическом уровнях моделирования функционально полного набора логических операций «И», «ИЛИ», «НЕ»;
- учёт различных видов зависимостей и множественных состояний элементов, представляемых с помощью групп несовместных событий (ГНС);
- учёт отказов групп элементов системы по общей причине и их комбинаторных отношений;
- учёт неограниченного числа циклических (мостиковых) связей между элементами систем;
- возможность расчёта вероятностных показателей монотонных моделей систем;
- возможность расчёта вероятностных показателей немонотонных (смешанных) моделей систем (учитывающих внешние воздействия, неправильные действия оператора, ошибки проектирования, нарушения правил эксплуатации и т. д.);

- возможность расчёта значимостей, положительных и отрицательных вкладов всех элементов в вероятность реализации исследуемых свойств системы;
- возможность расчёта вероятностей реализации отдельных кратчайших путей успешного функционирования и минимальных сечений отказов системы;
- высокая степень формализации, удобство программной реализации на ЭВМ с возможностью создания многоуровневых СФЦ.

А. Общий логико-вероятностный метод моделирования готовности радиоэлектронных систем космических комплексов

Кратко использование ОЛВМ для моделирования и оценивания готовности структурно-сложных систем, в том числе немонотонных, можно охарактеризовать следующими основными этапами [6]:

- Формализованная постановка задачи: построение структурной или функциональной модели исследуемой системы в виде СФЦ; задание одного или нескольких логических критериев функционирования системы K_{ci} ; учёт исходных данных – числовых значений собственных вероятностных параметров элементов системы; учёт ГНС (достоверно не реализуемых вместе на заданном интервале времени).
- Построение логической функции готовности системы K_c , характеризующей исследуемое свойство готовности системы.
- Построение многочлена вероятностной функции готовности:

$$P_c = P\{K_c\} = P\left(\{P_i, Q_i\}, i = \overline{1, N}\right),$$

где вероятность P определяет возможности реализации исследуемой системой её функции готовности K_c , определяемой заданными логическими критериями K_{ci} её функционирования, и зависящей от конъюнкций, дизъюнкций и инверсий N простых элементарных случайных событий (элементов модели системы) $\bar{x}_i = \{x_i, \bar{x}_i\}$, собственные вероятностные параметры которых (P_i и Q_i) считаются известными.

- Расчёт показателей готовности системы.

Кроме того, на сегодняшний день существует ряд направлений развития ОЛВМ, рассматривающих системы не только в вероятностном аспекте, но и в детерминированном. В частности, это логико-детерминированное моделирование (ЛДМ), основанное на развитии аппарата ОЛВМ для решения задач

детерминированного анализа сетевых моделей систем (сетевых графов и потоковых сетей) [5, 7].

В. Логико-детерминированный метод моделирования процессов функционирования радиоэлектронных систем космических комплексов

Основные принципы представления в рамках ЛДМ сетевых планов и потоковых сетей с помощью сетевых схем функциональной целостности (сетевых СФЦ) следующие [5]:

- с помощью функциональных вершин i представляются события x_i выполнения отдельных работ в сетевых планах или реализации функций элементами потоковых сетей;
- для каждого отдельного элемента (события, работы) x_i в сетевой СФЦ задаются значения соответствующих детерминированных параметров: t_i – время выполнения отдельной работы сетевого плана или потоковые параметры элементов потоков событий: w_i – рабочий поток, w_{ni} – нормативный поток, s_i – стоимость;
- конъюнктивными и дизъюнктивными дугами в сетевых СФЦ представляются детерминированные последовательности событий/работ, а также логические условия совместного функционирования групп последовательностей в моделируемой сети;
- фиктивными вершинами в сетевых СФЦ представляются отдельные события исходных графиков сетевых планов и графов потоков событий;
- дополнение правил комбинаторной алгебры логики путём исключения переместительного закона: $x_i x_j \neq x_j x_i$, тогда последовательности событий отображаются порядком записи «слева направо» логических переменных в отдельных конъюнкциях сетевых функций алгебры логики (ФАЛ):

$$x_i x_j x_k \dots x_n = x_i \rightarrow x_j \rightarrow x_k \dots \rightarrow x_n$$

- множество детерминированных последовательностей событий, образующих конъюнктивную группу, в записи сетевой ФАЛ представляются в матричном виде;
- решение систем уравнений графоаналитическим методом с помощью «дерева решений» программно или вручную, расчёт показателей результативности и оперативности функционирования системы.

Важной особенностью ЛДМ применительно к оцениванию эффективности функционирования РЭС КК является возможность учёта временных последовательностей событий (элементов модели системы), что не может быть учтено в рамках классических ЛВМ ввиду их комбинаторности. Это расширяет возможности оценивания временных затрат как одной из составляющих эффективности. Кроме того, ЛДМ позволяет анализировать каждую из компонент вектора Y_k

параметров качества функционирования системы V_{n1}, R_{n2}, T_{n3} как одну из возможных реализаций рассматриваемого свойства РЭС КК, при этом вероятность реализации, а также вероятность наступления событий соответствия параметров заданным критериям оценивается с помощью ОЛВМ.

Из вышесказанного следует, что существует объективная взаимосвязь и взаимодополнение детерминированных и вероятностных составляющих структурно-логического анализа систем и процессов их функционирования: при использовании логико-детерминированных методов анализа систем принимается допущение об абсолютной надёжности всех элементов; а при вероятностном анализе готовности постановка задач осуществляется на основе детерминированных схем готовности систем. При таком подходе осуществляется агрегирование моделей анализа эффективности функционирования РЭС КК.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сложных и больших технических систем, таких как РЭС КК, чёткое понятие отказа сформулировать затруднительно, как и понятия работоспособного и неработоспособного состояний. С учётом данной специфики представляется более верным говорить именно об эффективности их функционирования: степени решения стоящих перед ними задач, затраченных на это ресурсах и времени. Как показано выше, решающий вклад в эффективность функционирования РЭС КК как вероятность $P_{оц}$ достижения системой цели функционирования вносит её готовность, понимаемая расширенно. Предлагаемый комплексный подход к анализу РЭС КК на основе применения логико-вероятностного и логико-детерминированного моделирования позволяет повысить достоверность оценивания готовности и эффективности эксплуатации и применения по назначению РЭС КК в условиях возрастания состава, типов и численности ОГ КА и с учётом ряда других особенностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Эксплуатация космических средств: учебник / под ред. А.П. Вышинского. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. 477 с.
- [2] Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремлённых систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
- [3] ГОСТ 27.002-2015 Надёжность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
- [4] Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчёта надёжности технических систем. Изд. 2. М.: ЛЕНАРД, 2016. 256 с.
- [5] Гладкова И.А., Можаяев А.С., Мусаев А.А. Метод логико-детерминированного моделирования сетевых систем // Известия СПбГТИ. СПб.: СПбГТИ, 2012. Вып.14(40). С. 89–92.
- [6] Можаяев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надёжности структурно-сложных систем: учебное пособие. Л.: ВМА, 1988. 68 с.
- [7] Мусаев А.А., Гладкова И.А. Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем: тр. СПИИРАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН. СПб.: Анатолия, 2010. Вып.1(12). С. 75–96.